

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学 号: 200329023

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学  
硕 士 学 位 论 文

全金属环波导CO<sub>2</sub>激光器射频电源  
的研究与实践

**Study and Practice on RF Power of Annular Waveguide  
CO<sub>2</sub> Laser with All-metallic Material**

王 吉

指导教师姓名: 林 辉 副教授

专 业 名 称: 测试计量技术及仪器

论文提交日期: 2 0 0 6 年 5 月

论文答辩时间: 2 0 0 6 年 6 月

学位授予日期: 2 0 0 6 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2006 年 5 月

# 厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

## 摘要

射频激励CO<sub>2</sub>激光器，由于它所具有的一系列突出优点，如体积小、功率大、光束质量好、可靠性高、寿命长等，在工业加工、医疗外科和激光雷达等多个行业得到了广泛的应用。射频电源作为激光的功率来源，是激光器的一个重要组成部分。文章通过对射频电源的高频功率放大和阻抗匹配这两项关键技术的研究，结合全金属环波导CO<sub>2</sub>激光器对射频电源的要求，设计、制作了一个射频激光电源，并对各项关键参数进行了测量。论文的主要内容包括：

1. 阐述射频激励全金属环波导CO<sub>2</sub>激光器的结构和特征，分析一般射频CO<sub>2</sub>激光电源的结构和组成。

2. 详细的论述了射频电源的两项关键技术——高频功率放大和阻抗匹配。从原理和结构上指出高频功放与低频功放或者高频小信号放大器的区别。强调阻抗匹配网络在高频功放电阻中的重要性。

3. 从CO<sub>2</sub>激光器对射频电源的要求入手，进行射频电源电路设计，给出元件参数和具体型号、类别。电源电路包括：射频信号发生电路、射频功率放大电路、直流供电电路和附加保护电路，以及与激光头的匹配网络。重点是对射频功率放大电路和匹配网络的设计。

4. 按照电路 PCB 布线—制板—元件配置—焊接的顺序，依次介绍各个步骤，并对完成的电路进行综合调试。同时根据电路的特点，采取措施加强系统散热和抑制噪声、干扰。

5. 对试验结果进行分析，总结，并针对存在的问题和实用化的方向提出改进方法。

本文中设计的实验电源，频率稳定、效率高、结构小巧、噪音低、成本低廉，稍加改进即可实用。本设计是对射频激励全金属环波导CO<sub>2</sub>激光器电源而进行的一次有益探索和尝试。

**关键词：** CO<sub>2</sub>激光器；射频电源；高频功率放大；阻抗匹配网络

## Abstract

RF-excited CO<sub>2</sub> laser is more and more popularly used in industry, medical surgery and radar application because of its so many advantages such as small dimension, large power output, high reliability, long life-span and good beam of light. As power source of the laser, RF power plays an important role in the laser system. Based on the study of HF power amplifier and impedance matching technologies, the paper presents a way of how to design and then, make a RF CO<sub>2</sub> laser power, with the requirements demanded by the laser discharge tube of an annular waveguide CO<sub>2</sub> laser with all-metallic material.

Primary research works in this thesis are as follows :

1. Structure and characteristic of a RF-excited annular waveguide CO<sub>2</sub> laser with all-metallic material CO<sub>2</sub> laser are studied. At the same time, configuration and composition of a normal RF-excited CO<sub>2</sub> laser power are analysed.

2. HF power amplifier and impedance matching are two key technologies in RF power. After compared with LF power amplifier and HF small signal amplifier in theory, the principle of HF power amplifier are discussed in detail, and the importance of impedance matching is also emphasized.

3. A RF-excited CO<sub>2</sub> laser power is designed, with its' feature meeting the requirements. The power circuit is composed of following circuits: RF oscillator, RF power amplifier, DC supply power circuit, protection circuit and matching network. The key points are the design of the RF power amplifier and the impedance matching network.

4. Routing, PCB production, layout and weld—4 steps of making a circuit are presented in turn, followed by adjusting and trim. Some steps are carried out to improve power transistors' heat dispelling and restraining of noise and interference.

5. After analysing the experiment data, draw a conclusion and put forward some improvement suggestions.

Compared with some developed countries, we have a long way to go in

RF-excited CO<sub>2</sub> laser power. The RF CO<sub>2</sub> laser and its power system are mainly imported from those countries. The experimental RF-excited CO<sub>2</sub> laser power designed in this paper has following virtues: stable frequency, high efficiency, low noise and low cost. It is a meaningful try for the development of domestic RF power for an annular waveguide CO<sub>2</sub> laser with all-metallic material .

**Key words:** CO<sub>2</sub> laser; RF power; HF power amplifier; Impedance matching network

## 目录

摘 要.....	I
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 射频激励 CO <sub>2</sub> 激光器.....	1
1.1.1 射频激励 CO <sub>2</sub> 激光器的发展概况 .....	1
1.1.2 射频激励 CO <sub>2</sub> 激光器的分类.....	3
1.2 射频激励全金属环波导 CO <sub>2</sub> 激光器.....	7
1.2.1 特征.....	7
1.2.2 结构.....	9
1.2.3 其它关键技术.....	9
1.3 射频激励 CO <sub>2</sub> 激光器的电源.....	11
1.3.1 输入回路.....	11
1.3.2 振荡回路.....	11
1.3.3 放大回路.....	11
1.3.4 匹配网络.....	12
1.3.5 控制网络.....	12
1.4 本课题的主要内容.....	13
1.5 小结.....	13
第 2 章 高频功率放大器和阻抗匹配技术.....	14
2.1 高频电路及元器件的高频特性.....	14
2.1.1 高频电路中的元器件.....	14
2.2 功率放大器.....	19
2.2.1 放大器的种类.....	20
2.2.2 小信号放大器和功率放大器.....	20
2.3 高频功率放大器.....	21
2.3.1 低频功放和高频功放.....	21
2.3.2 高频功放原理.....	21
2.3.3 高频功放结构.....	23
2.4 阻抗匹配.....	25
2.4.1 阻抗匹配的意义.....	25
2.4.2 阻抗匹配的形式.....	27
2.5 小结.....	30
第 3 章 射频 CO <sub>2</sub> 激光器电源的系统结构与电路设计.....	31
3.1 激光器电源的指标要求.....	31
3.1.1 波形.....	31
3.1.2 频率.....	31
3.1.3 输出功率.....	31

3.1.4	电压.....	32
3.1.5	过压、过流、过热等保护.....	32
3.2	<b>激光器电源的系统结构.....</b>	32
3.3	<b>射频信号发生电路.....</b>	33
3.3.1	晶体振荡电路.....	33
3.3.2	射极跟随电路.....	34
3.3.3	推挽射极跟随电路.....	35
3.4	<b>射频功率放大电路.....</b>	36
3.4.1	功率放大器设计步骤.....	36
3.4.2	放大级数和增益分配.....	37
3.4.3	输入级.....	38
3.4.4	中间级.....	40
3.4.5	末前级.....	47
3.4.6	输出级.....	48
3.5	<b>电源与激光器的匹配.....</b>	50
3.5.1	激光放电管等效阻抗.....	50
3.5.2	射频放电击穿前的波反射问题.....	51
3.5.3	满足要求的 $\pi$ 型匹配网络.....	51
3.6	<b>外围直流供电电路.....</b>	52
3.7	<b>附加保护电路.....</b>	53
3.7.1	过电流保护电路.....	53
3.7.2	过热保护电路.....	54
3.7.3	封锁电路.....	54
3.8	<b>小结.....</b>	55
<b>第4章 电源电路的实现.....</b>		56
4.1	<b>电路元件的选择.....</b>	56
4.1.1	电阻器选择.....	56
4.1.2	电容器选择.....	57
4.1.3	电感器选择.....	58
4.1.4	晶体管选择.....	59
4.2	<b>电路的布线、制板、元件配置、焊接和调试.....</b>	61
4.2.1	布线.....	61
4.2.2	PCB 板制作.....	63
4.2.3	元器件配置.....	63
4.2.4	焊接.....	64
4.2.5	调试.....	65
4.3	<b>系统的散热.....</b>	66
4.3.1	热的危害和控制.....	66
4.3.2	功率晶体管的散热.....	67
4.4	<b>噪声、干扰及其抑制.....</b>	71
4.4.1	噪声、干扰及其危害.....	71
4.4.2	抑制噪声和干扰的措施.....	72



4.5 小结.....	73
<b>第 5 章 结论和改进.....</b>	<b>74</b>
5.1 实验结果和结论.....	74
5.1.1 实验结果.....	74
5.1.2 实验结论.....	79
5.2 改进措施.....	80
5.3 小结.....	80
致谢.....	81
参考文献.....	82
附录 1 射频电源主电路.....	84
附录 2 实验系统各单元和设备照片.....	85

## Contents

<b>Abstract</b> .....	III
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
<b>1.1 RF-excited CO<sub>2</sub> laser</b> .....	1
1.1.1 History and current Statu.....	1
1.1.2 Category.....	3
<b>1.2 RF-excited annular waveguide CO<sub>2</sub> laser with all-metallic materials</b> .....	7
1.2.1 Characteristic.....	7
1.2.2 Structure.....	9
1.2.3 Other key technologies.....	9
<b>1.3 RF Power for the CO<sub>2</sub> laser</b> .....	11
1.3.1 Input circuit.....	11
1.3.2 Oscillator.....	11
1.3.3 Amplifier circuit.....	11
1.3.4 Matching network.....	12
1.3.5 Control network.....	12
<b>1.4 Main works</b> .....	13
<b>1.5 Summary</b> .....	13
<b>Chapter 2 HF power amplifier and impedance matching</b> .....	14
<b>2.1 HF circuits and HF characteristics of basic components</b> .....	14
2.1.1 “HF effect” of components.....	14
<b>2.2 Power amplifier</b> .....	19
2.2.1 Category.....	20
2.2.2 Small signal amplifier and power amplifier.....	20
<b>2.3 HF power amplifier</b> .....	21
2.3.1 LF power amplifier and HF power amplifier.....	21
2.3.2 Theory.....	21
2.3.3 Structure.....	23
<b>2.4 Impedance matching</b> .....	25
2.4.1 Purpose.....	25
2.4.2 Forms.....	27
<b>2.5 Summary</b> .....	30
<b>Chapter 3 Structure and circuits design for RF power</b> .....	31
<b>3.1 Requirements to the power</b> .....	31
3.1.1 Waveshape.....	31
3.1.2 Frequency.....	31
3.1.3 Power output.....	31
3.1.4 Voltage.....	32

3.1.5 Protection circuits. . . . .	32
<b>3.2 Structure of the RF power. . . . .</b>	<b>32</b>
<b>3.3 RF signal oscillating circuit. . . . .</b>	<b>33</b>
3.3.1 Crystal oscillator. . . . .	33
3.3.2 Emitter follower. . . . .	34
3.3.3 Push-pull emitter follower. . . . .	35
<b>3.4 RF power amplifier. . . . .</b>	<b>36</b>
3.4.1 Steps of design. . . . .	36
3.4.2 Series and gain power. . . . .	37
3.4.3 Input amplifier. . . . .	38
3.4.4 Mid— I amplifier. . . . .	40
3.4.5 Mid— II amplifier. . . . .	47
3.4.6 Output amplifier. . . . .	48
<b>3.5 Matching network between RF power and CO<sub>2</sub> laser. . . . .</b>	<b>50</b>
3.5.1 Equivalent impedance of discharge tube. . . . .	50
3.5.2 Wave reflection before RF discharge. . . . .	51
3.5.3 $\pi$ matching network. . . . .	51
<b>3.6 DC power supply circuit. . . . .</b>	<b>52</b>
<b>3.7 Protection circuits. . . . .</b>	<b>53</b>
3.7.1 Over-current protection circuit. . . . .	53
3.7.2 Over-heat protection circuit. . . . .	54
3.7.3 Close circuit. . . . .	54
<b>3.8 Summary. . . . .</b>	<b>55</b>
<b>Chapter 4 Realization of the RF power. . . . .</b>	<b>56</b>
<b>4.1 Selection of components. . . . .</b>	<b>56</b>
4.1.1 Resistance. . . . .	56
4.1.2 Capacitance. . . . .	57
4.1.3 Inductance. . . . .	58
4.1.4 Bipolar transistor. . . . .	59
<b>4.2 Practice. . . . .</b>	<b>61</b>
4.2.1 Routing. . . . .	61
4.2.2 PCB production. . . . .	63
4.2.3 Layout. . . . .	63
4.2.4 Weld. . . . .	64
4.2.5 Adjusting. . . . .	65
<b>4.3 Heat dispelling. . . . .</b>	<b>66</b>
4.3.1 Disadvantage and control of heat. . . . .	66
4.3.2 Heat dispelling of bipolar transistor. . . . .	67
<b>4.4 Restraining of noise and interference. . . . .</b>	<b>71</b>
4.4.1 Noise and interference. . . . .	71
4.4.2 Ways of Restraining. . . . .	72
<b>4.5 Summary. . . . .</b>	<b>73</b>

<b>Chapter 5</b>	<b>Conclusions and improvements.</b>	74
<b>5.1</b>	<b>Results and Conclusions.</b>	74
5.1.1	Results.	74
5.1.2	Conclusions.	79
<b>5.2</b>	<b>Improvements.</b>	80
<b>5.3</b>	<b>Summary.</b>	80
<b>Thanks.</b>		81
<b>References.</b>		82
<b>Appendix:</b>		
	<b>Circuit diagram.</b>	84
	<b>Photographs.</b>	85

## 第1章 绪论

### 1.1 射频激励CO<sub>2</sub>激光器

在现代工业生产中, 激光加工已经日益成为了一个不可或缺的重要组成部分。激光加工技术作为一种先进制造技术, 解决了许多常规方法无法解决的难题, 在工业切割、焊接、雕刻、打孔、打标、表面改性、快速成型及微细加工等方面得到了广泛应用, 被誉为“未来制造系统的共同加工手段”。激光加工业所使用的激光器中, CO<sub>2</sub>激光器技术发展得最为成熟、输出功率最大、应用也最为广泛。随着激光技术的发展和电子技术的进步, CO<sub>2</sub>激光器经历了由直流激励到交流高频激励, 发展到目前的射频激励的过程。作为CO<sub>2</sub>激光技术的后来者, 射频激励CO<sub>2</sub>激光器由于其相比于直流、高频激励的独特优点, 从它诞生之日起就受到了业界的瞩目, 代表着CO<sub>2</sub>气体激光技术发展的方向。射频CO<sub>2</sub>激光器, 具有装置紧凑、封离运转、免维护、成本低、调制特性优良、输出光束质量高、功率稳定性优异、运行可靠性高和使用寿命长等优秀性能。加之, 在各类商用激光器中, CO<sub>2</sub>激光器的每瓦输出成本始终最低, 插头效率较高, 多数材料对 10.6 $\mu$ m左右的激光辐射吸收强烈, 激光器运转模式可在连续、脉冲、增益开关和调Q之间进行选择, 这给加工带来了诸多灵活性, 从而博得了材料加工、医疗外科和激光雷达等业界人士的青睐<sup>[1]</sup>。

#### 1.1.1 射频激励CO<sub>2</sub>激光器的发展概况

##### 1. 国外发展概况

七十年代后期, 伴随着航天和军事技术的发展对CO<sub>2</sub>激光器的性能和技术参数提出的新要求, 射频波导CO<sub>2</sub>激光器技术得到了长足的进步。1979年, Laakmann等人在专利U. S. Pat. No. 4, 169, 251<sup>[2]</sup>中第一次描述了一个令人满意的封离型波导CO<sub>2</sub>激光器的激励方案。它采用正方形截面的射频放电腔结构, 由金属和陶瓷材料共同构成。到了八十年代, 射频波导CO<sub>2</sub>激光器技术趋于成熟, 市场上已有大量的商品波导CO<sub>2</sub>激光器供应, 这些供应市场的射频波导CO<sub>2</sub>激光器主要是技术比较成熟的全陶瓷和金属-陶瓷结构。同时, 为了在有限的体积内得到更高的激光

功率输出,板条CO<sub>2</sub>激光器也开始出现。1981年,发明了扩散冷却板条结构的射频激励CO<sub>2</sub>激光器,它被证明是有史以来最好的中小功率射频激励CO<sub>2</sub>激光器。到了1985年,Laakmann等人又创造性地将射频激励技术与激光技术有机的结合在一起,研制出了全新概念的全金属结构射频激励CO<sub>2</sub>激光器。

在单波导激光器发展的同时,美国的D. Youmans等人在1984年提出了波导阵列CO<sub>2</sub>激光器技术<sup>[3]</sup>。随后,波导阵列从一维结构发展到二维结构。1986年,美国UTRC的L. A. Newman等人发明了空心脊波导阵列,在37cm长5单元列阵中,获得了105W的部分相位锁定输出<sup>[4]</sup>。1987年,法国的Bourdet等人提出的自聚焦波导阵列,在50cm长的9波导中,获得了120W单频率衍射极限输出,200W的多模输出<sup>[5]</sup>。1996年,英国的D. R. Hall等人报道了一种射频激励扩散型冷却二维波导阵列CO<sub>2</sub>激光器,激光输出功率达到2kW。

1989年,英国的D. R. Hall等人首次报道了面增比技术(area scaling),使得射频激励扩散冷却大功率CO<sub>2</sub>激光技术在九十年代得到了快速的发展。一年后,德国DLR技术物理研究所的Nowack等人在SPIE会议上发表了“射频扩散型冷却大功率CO<sub>2</sub>激光器技术”的学术论文,他们在实验室获得了500W的激光功率输出,从技术上论证了实现千瓦级扩散冷却型大功率CO<sub>2</sub>激光器的可能性。1992年,英国的D. R. Hall等人报道了单板条CO<sub>2</sub>激光器,获得了1.06kW的输出,光电效率为12%。1994年,加拿大Allerta大学Yelden等人采取了径向排列的板条式CO<sub>2</sub>激光器。1996年,日本东芝公司也研制了电源与激光头一体的1kW射频激励扩散冷却型板条波导CO<sub>2</sub>激光器<sup>[6]</sup>。此外,在1993年,意大利国家光学研究所的A. Lapucci等人报道了三层叠式板条CO<sub>2</sub>激光器,开创了层叠式板条CO<sub>2</sub>激光器结构的先河。

面增比技术在促进板条射频CO<sub>2</sub>激光器发展的同时,也促使了同轴结构大功率CO<sub>2</sub>激光器的出现和发展。1994年,德国Fraunhofer激光技术研究所的Ehrlichmann等人,提出了一种环形非稳腔结构,利用同轴放电形成的环形增益与环形非稳腔匹配,获得了1kW的激光功率输出。两年后,德国DLR技术物理研究所的Nowack等人又报道了射频激励扩散型冷却同轴结构大功率CO<sub>2</sub>激光器,获得了1200W的激光功率输出。

## 2. 国内发展概况<sup>[7]</sup>

我国在射频激励波导CO<sub>2</sub>激光器件的研究工作虽然起步较晚，但进展迅速。1991年，北京理工大学的辛建国和魏光辉等人提出了一种漏模耦合结构的极限尺寸波导阵列CO<sub>2</sub>激光器技术，从200mm增益长度器件中获得了相当于1×13波导阵列CO<sub>2</sub>激光器的同相锁定45W功率输出。1994年，辛建国又提出了体增比技术(volume scaling)的概念及实现的技术途径，研究出板条波导阵列CO<sub>2</sub>激光器件，从500mm电极长度中获得1040W的激光功率输出，光电转换效率大于12%<sup>[8]</sup>。同时，西南技术物理所兰戈等人采用射频激励平板—非稳腔的CO<sub>2</sub>激光器，在1.55mm×300mm×400mm的波导内，获得133W的激光输出，光电转换效率达到11%。另外，电子部12所、华中科技大学、浙江大学、厦门大学等单位均开展了射频激励波导CO<sub>2</sub>激光器技术的研究，并取得了一定的成果。

### 1.1.2 射频激励CO<sub>2</sub>激光器的分类

按照不同的分类方法，射频CO<sub>2</sub>激光器有许多不同的种类<sup>[9]</sup>。如(1)按照输出方式可分为：连续输出；脉冲输出—调制频率可高达1MHz；Q开关输出—电光调Q与声光调Q。(2)按谐振腔的工作分为：波导腔(孔径D=1~3mm)；自由空间腔(孔径D=4~6mm)。(3)按激励极性可分为：单相；反相。(4)按腔体结构可分为：单腔；多腔；大面积放电。其中的多腔可细分为：折叠腔；列阵腔；积木式。而大面积放大又可分为：平板型和同心环型。(5)按均恒电感分布方式分为：准电感谐振技术—用于低电容激光头；平行分布电感谐振技术—用于高电容激光头。(6)按谐振腔材料可分为：全陶瓷型；陶瓷-金属混合型；全金属型。(7)按冷却方式分为：空气冷却；水冷却。(8)按封装方式分为：封离型；流动型。其中又以腔体结构作为区别射频CO<sub>2</sub>激光器种类的主要依据。下面将详细介绍不同腔体结构的射频CO<sub>2</sub>激光器。

#### 1. 单波导结构

顾名思义，单波导是指腔体由单一波导放电腔构成。在七十年代初，首先出现的是圆柱形单波导腔，见图1.1(a)。腔体材料为玻璃或陶瓷。放电电极置于圆柱放电管的外面。为了解决散热问题，通常将接地电极与金属真空密封的激光头壳体紧密配合。金属真空密封的激光头壳体兼做射频场的屏蔽层。随后就出现了全陶瓷的正方形截面的单波导射频放电腔，见图1.1(b)。七十年代用于军事，

九十年代中叶用于工业，结构原理与圆柱形单波导腔相同。随着射频激励扩散冷却单波导CO<sub>2</sub>激光技术的发展，单波导结构经历了从全陶瓷、陶瓷-金属到全金属结构的发展过程。陶瓷-金属波导是在全陶瓷结构的基础上去除上下两块陶瓷板，电极直接与侧壁陶瓷构成1~3mm的放电通道，如图1.1(c)所示。由于陶瓷和金属对光的损耗不同而形成线偏振输出激光。而如图1.1(d)所示的全金属波导是将侧壁的两条陶瓷也用金属取代。所有金属或者两侧壁金属经阳极氧化处理，且电极间留有小于0.1mm的间隙，使得此处处于巴邢曲线的左支，难于电击穿，这样就把放电区域限制在了波导通道内。

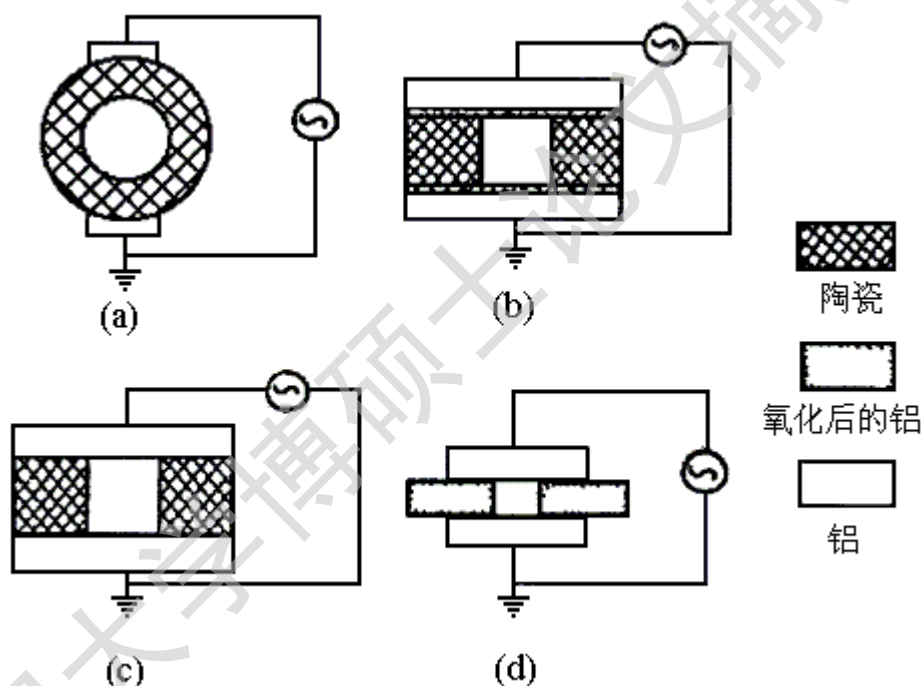


图 1.1 射频放电腔结构 (a) 圆柱形单波导 (b) 陶瓷矩形截面波导  
(c) 陶瓷-金属矩形截面波导 (d) 全金属矩形截面波导

## 2. 折叠结构

单波导结构虽然简单，但存在一个问题：输出激光功率不大。这样它的应用就受到了限制，如何解决这个问题？一个行之有效的方法就是增加放电区域的长度，于是折叠式射频放电腔应用而生，其结构如图1.2所示。这种折叠的方法不但提高了激光器输出功率，而且又保持了波导激光器体积小特点。折叠腔的具体结构有“V”、“Z”等形式。但引入的折叠镜不可避免得引起了内腔损耗和模式



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库